

BEST AVAILABLE COPY



# Ministero delle Attività Produttive

Direzione Generale per lo Sviluppo Produttivo e la Competitività

Ufficio Italiano Brevetti e Marchi

Ufficio G2

REC'L 25 MAY 2004

WIPO

PCT

Autenticazione di copia di documenti relativi alla domanda di brevetto per: **Invenzione Industriale**  
N. TO2003 A 000317



*Si dichiara che l'unita copia è conforme ai documenti originali  
depositati con la domanda di brevetto sopraspecificata, i cui dati  
risultano dall'accluso processo verbale di deposito.*

## PRIORITY DOCUMENT

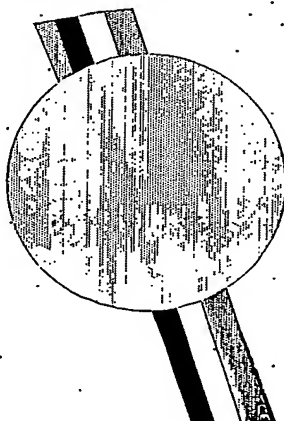
SUBMITTED OR TRANSMITTED IN  
COMPLIANCE WITH RULE 17.1(a) OR (b)

Roma, li 10 MAG. 2004

IL FUNZIONARIO

Giampietro Carlotto

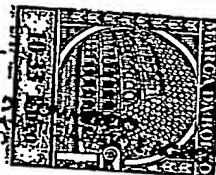
*Giampietro Carlotto*



AL MINISTERO DELL'INDUSTRIA DEL COMMERCIO E DELL'ARTIGIANATO  
UFFICIO ITALIANO BREVETTI E MARCHI - ROMA

DOMANDA DI BREVETTO PER INVENZIONE INDUSTRIALE. DEPOSITO RISERVE, ANTICIPATA ACCESSIBILITÀ AL PUBBLICO

MODULO CAMERA  
INDUSTRIA  
DI TORINO



A. RICHIEDENTE (1)

1) Denominazione Bright Solutions Soluzioni Laser Innovative S.r.l.

Residenza Cura Carpignano (PV)

2) Denominazione

Residenza

codice 01765080187

M.G.  
SR

B. RAPPRESENTANTE DEL RICHIEDENTE PRESSO L'U.I.B.M.

cognome nome Crovini Giorgio

denominazione studio di appartenenza Ing. Giorgio Crovini

via Tintoretto

n. 12 città Torino

cod. fiscale

cap 10136

(prov) TO

C. DOMICILIO ELETTIVO destinatario

via

n. 12

città

cap

(prov)

D. TITOLO

DISPOSITIVO LASER PER LA GENERAZIONE DI UN FASCIO LASER VISIBILE

classe proposta (sax/ci/aci)

gruppo/sottogruppo

ANTICIPATA ACCESSIBILITÀ AL PUBBLICO: SÌ ☐ NO ☒

E. INVENTORI DESIGNATI

cognome nome

SE ISTANZA: DATA

N° PROTOCOLLO

1) DELL'ACQUA Stefano

2) PICCINNO Giuliano

3)

4)

F. PRIORITÀ

nazione o organizzazione

tipo di priorità

numero di domanda

data di deposito

allegata S/R

1)

2)

G. CENTRO ABILITATO DI RACCOLTA COLTURE DI MICROORGANISMI, denominazione

H. ANNOTAZIONI SPECIALI

DOCUMENTAZIONE ALLEGATA

N. es.

Doc. 1) 1

PROV

n. pag 131

riassunto con disegno principale, descrizione e rivendicazioni (obbligatorio 1 esemplare)

Doc. 2) 1

PROV

n. tav. 193

disegno (obbligatorio se citato in descrizione, 1 esemplare)

Doc. 3) 1

RIS

leggi del 1978, art. 10, comma 1, lettera b) (obbligatorio se citato in descrizione, 1 esemplare)

Doc. 4) 1

RIS

designazione inventore

Doc. 5) 1

RIS

documenti di priorità con traduzione in italiano

Doc. 6) 1

RIS

autorizzazione o atto di cessione

Doc. 7) 1

nomativo completo del richiedente

8) attestati di versamento, totale lire

€ DUECENTONOVANTUNO/80 (€ 291,80)

COMPILATO IL 22/04/2003

FIRMA DEL(1) RICHIEDENTE (1)

Ing. Giorgio CROVINI

obbligatorio

CONTINUA SÌ/NO NO

DEL PRESENTE ATTO SI RICHIEDE COPIA AUTENTICA SÌ/NO SÌ

SCIOGLIMENTO RISERVE	
Data	N° Protocollo

SCIOGLIMENTO RISERVE	
Data	N° Protocollo

CAMERA DI COMMERCIO I.A.A. DI

TORINO

2003A000317

codice 191

VERBALE DI DEPOSITO

NUMERO DI DOMANDA

DUEMILATRE

L'anno millenovecento

, il giorno VENTITRE

, del mese di APRILE

il(1) richiedente(1) sopraindicato(1) ha(hanno) presentato a me sottoscritto la presente domanda, corredata di n. 190 fogli aggiuntivi per la concessione del brevetto sopraportate.

I. ANNOTAZIONI VARIE DELL'UFFICIALE ROGANTE

IL DEPOSITANTE

Giorgio CROVINI



timbro  
CAMERA DI COMMERCIO  
INDUSTRIA ARTIGIANATO E AGRICOLTURA  
DI TORINO

L'UFFICIALE ROGANTE

Loredana ZELLADA

CATEGORIA C

NUMERO DOMANDA

REG. A

DATA DI DEPOSITO

NUMERO BREVETTO

DATA DI RILASCIO

A. RICHIEDENTE (I)

Denominazione Bright Solutions Soluzioni Laser Innovative s.r.l.

Residenza Strada Paiola 3, 27010 Cura Carpignano (PV)

B. TITOLO

DISPOSITIVO LASER PER LA GENERAZIONE DI UN FASCIO LASER VISIBILE

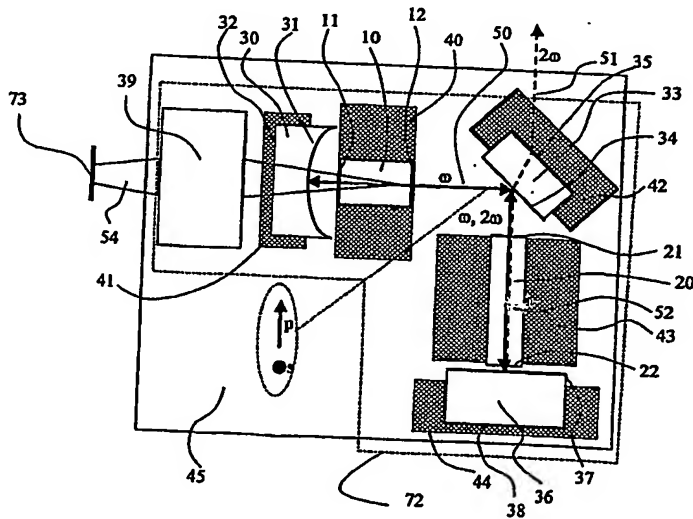
Classe proposta (se2,cl/sect)

(gruppo/sottogruppo)

L. RIASSUNTO

Dispositivo laser pompato a diodi per la generazione di un fascio visibile di potenza, del tipo che comprende:  
-una cavità laser (72) lineare miniaturizzata e a bassissime perdite comprendente almeno i seguenti elementi ottici (30,33,36,10,20): mezzi riflettenti (30;33;36) altamente riflettenti a una lunghezza d'onda fondamentale, almeno uno di detti mezzi riflettenti (30) essendo attraversato da un fascio di pompaggio (55), almeno uno di detti mezzi riflettenti (36) essendo riflettente alla lunghezza d'onda fondamentale e alla lunghezza d'onda di seconda armonica e almeno uno di detti mezzi riflettenti (33) essendo altamente trasmissivo alla seconda armonica (51) di detta lunghezza d'onda fondamentale; un materiale attivo (10) ad emissione polarizzata e con una configurazione di guadagno a bassa aberrazione termica per il modo di cavità, detto materiale attivo (10) essendo in grado di generare luce laser (50) ad una lunghezza d'onda fondamentale; un cristallo non lineare (20), all'interno di tale cavità (72). Secondo l'invenzione detto cristallo non lineare (20) è atto a generare una seconda armonica (51) di detta lunghezza d'onda fondamentale tramite phase matching di tipo I, critico e detta cavità (72) è associata a uno o più mezzi di termostatazione (45;41;42;43;44) per agganciare in temperatura detta cavità (72) e i suoi elementi ottici (30,33,36,10,20), e per fissare con accuratezza la temperatura del cristallo non lineare (10).

M. DISEGNO



Descrizione dell'invenzione industriale dal titolo:

**- BRS003-**

**"DISPOSITIVO LASER PER LA GENERAZIONE DI UN FASCIO LASER VISIBILE"**

di Bright Solutions Soluzioni Laser Innovative s.r.l., di nazionalità italiana, con sede in Strada Paiola 3, 27010 Cura Carpignano (PV), ed elettivamente domiciliata presso il Mandatario Ing. Giorgio Crovini (N.Iscr. 857 BM), via Tintoretto, 12 10136 TORINO.

Inventori designati: Stefano Dell'Acqua, Via N. Sauro, 25 27100 Pavia

Giuliano Piccinno Via Milanese, 6 27028 San Martino Siccomario (PV)

Depositata il **23 APR. 2003**

No.

**RIASSUNTO**

**TO 2003 A 000317**

Dispositivo laser pompato a diodi per la generazione di un fascio visibile di potenza, del tipo che comprende:

-una cavità laser (72) lineare miniaturizzata e a bassissime perdite comprendente almeno i seguenti elementi ottici (30,33,36,10,20): mezzi riflettenti (30;33;36) altamente riflettenti a una lunghezza d'onda fondamentale, almeno uno di detti mezzi riflettenti (30) essendo attraversato da un fascio di pompaggio (55), almeno uno di detti mezzi riflettenti (36) essendo riflettente alla lunghezza d'onda fondamentale e alla lunghezza d'onda di seconda armonica e almeno uno di detti mezzi riflettenti (33) essendo altamente trasmissivo alla seconda armonica (51) di detta lunghezza d'onda fondamentale; un materiale attivo (10) ad emissione polarizzata e con una configurazione di guadagno a bassa aberrazione termica per il modo di cavità, detto materiale attivo (10) essendo in grado di generare luce laser (50) ad una lunghezza d'onda fondamentale; un cristallo non lineare (20), all'interno di tale cavità (72). Secondo l'invenzione detto cristallo non lineare (20) è atto a generare una seconda armonica (51) di detta lunghezza d'onda fondamentale tramite phase matching di tipo

Ing. Giorgio CROVINI



I, critico e detta cavità (72) è associata a uno o più mezzi di termostatazione (45;41;42;43;44) per agganciare in temperatura detta cavità (72) e i suoi elementi ottici (30,33,36,10,20), e per fissare con accuratezza la temperatura del cristallo non lineare (10).

### DESCRIZIONE

La presente invenzione si riferisce a un dispositivo laser pompato a diodi per la generazione di un fascio visibile, del tipo che comprende: una cavità laser lineare miniaturizzata e a bassissime perdite comprendente almeno i seguenti elementi ottici: mezzi riflettenti, altamente riflettenti a una lunghezza d'onda fondamentale, almeno uno di detti mezzi riflettenti essendo attraversato da un fascio di pompaggio, almeno uno di detti mezzi riflettenti essendo riflettente alla lunghezza d'onda fondamentale e alla lunghezza d'onda di seconda armonica e almeno uno di detti mezzi riflettenti essendo altamente trasmissivo alla seconda armonica di detta lunghezza d'onda fondamentale; un materiale attivo ad emissione polarizzata e con una configurazione di guadagno a bassa aberrazione termica per il modo di cavità, detto materiale attivo essendo in grado di generare luce laser ad una lunghezza d'onda fondamentale; un cristallo non lineare (20), all'interno di tale cavità (72).

E' ben noto che il metodo più efficiente per ottenere luce laser a lunghezze d'onda visibili con elevata potenza e qualità spaziale del fascio consiste nell'applicare tecniche di duplicazione di frequenza all'interno della cavità laser di un fascio laser infrarosso, del tipo generato ad esempio da ioni attivi di  $\text{Nd}^{3+}$  diffusi in un'opportuna matrice cristallina. In particolare, l'utilizzo di materiali laser come il  $\text{Nd}^{3+}:\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$  (Nd:YAG) e cristalli non lineari opportuni consente di ottenere, tramite processi di duplicazione di frequenza, lunghezze d'onda attorno a  $0.48 \mu\text{m}$  (blu),  $0.53 \mu\text{m}$  (verde),  $0.56 \mu\text{m}$  (giallo),  $0.66 \mu\text{m}$  e  $0.7 \mu\text{m}$  (rosso), con potenze medie ed efficienze di conversione elettrica-ottica molto

Ing. Giorgio CROVINI

elevate, se confrontate con i rispettivi valori relativi a sorgenti laser a gas quali Kr, Ar, HeCd etc.

L'introduzione recente del pompaggio con diodi laser a semiconduttore ha aumentato in notevole misura l'efficienza complessiva di tali sistemi a stato solido.

Poiché l'efficienza di un processo di conversione in seconda armonica dipende, grossolanamente, dal quadrato dell'intensità del fascio generatore, grande vantaggio si ricava dal porre un cristallo non lineare, mediatore del processo di conversione di frequenza, all'interno della cavità laser infrarossa. Tale tecnica di duplicazione di frequenza in cavità, nota come ICSHG (Intracavity Second Harmonic Generation), è stata proposta nei primi anni '60 e, da allora, utilizzata in numerosi dispositivi.

I più efficienti sistemi laser a stato solido con ICSHG attualmente disponibili sul mercato emettono radiazione verde con livelli di potenza di numerosi Watt, sono pompati a diodi e utilizzano prevalentemente il materiale attivo  $\text{Nd}^{3+}:\text{YVO}_4$  alla lunghezza d'onda fondamentale di 1064nm. Dalla pubblicazione *Magni et aliis*, Opt. Lett 18, 2111, 1993, è noto impiegare una cavità lunga alcune decine di cm per limitare la rumorosità del processo di conversione, che è quindi caratterizzata da perdite diffrattive non trascurabili.

Per contrastare l'effetto delle perdite lineari della cavità risonante, che tendono a ridurre la potenza infrarossa circolante in cavità, è noto impiegare un materiale attivo ad elevatissimo guadagno, quale, appunto, il  $\text{Nd}^{3+}:\text{YVO}_4$ . Inoltre l'efficienza del processo di conversione di frequenza risulta elevata grazie alla forte focalizzazione del fascio infrarosso a 1064nm di lunghezza d'onda in un cristallo non lineare di  $\text{LiB}_3\text{O}_5$  (Triborato di Litio, noto come LBO); poiché, usualmente, il processo fisico di accordo della velocità di propagazione dei fasci infrarosso e visibile nel cristallo non lineare, che consente la conversione efficiente, detto *phase matching*, è fortemente sensibile all'angolo di incidenza del fascio sul cristallo non lineare e alla distribuzione angolare del fascio, una

Ing. Giorgio CROVINI

focalizzazione così spinta risulta possibile solo utilizzando il cosiddetto phase matching *non critico*, ovvero non sensibile alla distribuzione angolare del fascio duplicando, condizione che si raggiunge scaldando il cristallo di LBO alla temperatura approssimativa di 160°C per il processo di duplicazione da 1064 a 532nm di lunghezza d'onda.

E' chiaro che un sistema così ottenuto, per quanto molto efficiente, presenta alcuni limiti intrinseci.

Le realizzazioni note nello stato dell'arte conseguono prestazioni ottimali utilizzando cavità laser di dimensioni rilevanti, che male si adattano all'integrazione in quei sistemi nei quali si richiedano ingombri limitati dei componenti (per esempio applicazioni aerospaziali).

L'utilizzo di un cristallo non lineare in phase matching non critico richiede la presenza di un elemento riscaldatore ingombrante ed energeticamente svantaggioso oltre che penalizzante per l'affidabilità a causa del ciclo di riscaldamento/raffreddamento cui il cristallo non lineare è sottoposto all'accensione e allo spegnimento del sistema.

Inoltre le realizzazioni note dallo stato dell'arte non consentono di generare le lunghezze d'onda di principale interesse con alta efficienza da una medesima struttura di dispositivo laser. In particolare, non risultano disponibili commercialmente sorgenti laser a stato solido pompate a diodi in grado di fornire luce blu o rossa con potenze superiori al watt, ad eccezione di complesse sorgenti in Mode Locking, è soprattutto con una struttura di cavità comune per tutte le lunghezze d'onda.

Inoltre, ancora, le realizzazioni di sistemi laser a stato solido con ICSHG note sono caratterizzate da una notevole complessità di messa a punto e sono fortemente sensibili alla variazione di parametri quali l'allineamento del risonatore, la temperatura ambientale, il valore della potenza di pompa.



Ing. Giorgio CROVINI  
G. Crovini

La presente invenzione si prefigge lo scopo di realizzare una soluzione che consenta la produzione di fasci laser a lunghezza d'onda visibile con potenza dell'ordine o superiore al watt e alta qualità spaziale del fascio.

Secondo la presente invenzione, tale scopo viene raggiunto grazie ad un dispositivo laser avente le caratteristiche richiamate in modo specifico nelle rivendicazioni che seguono.

In breve, la soluzione proposta prevede un dispositivo per la produzione di un fascio laser visibile, ottenuto tramite la duplicazione di frequenza in cavità di un fascio laser infrarosso generato da un laser a stato solido pompato a diodi ad elementi discreti, che si basa funzionalmente sull'utilizzo combinato di una struttura di cavità miniaturizzata, di un materiale attivo ad emissione polarizzata, come  $\text{Nd:GdVO}_4$  o  $\text{Nd:YLF}$  o  $\text{Nd:YVO}_4$ , con una configurazione di guadagno a bassa aberrazione termica per il modo di cavità, del cristallo non lineare  $\text{LiB}_3\text{O}_5$  (o  $\text{YCOB}$  o  $\text{GdCOB}$ ) in phase matching di tipo I critico, e di un sistema di termoregolazione/rimozione del calore dell'intera cavità.

Ulteriori scopi, caratteristiche e vantaggi della presente invenzione risulteranno chiari dalla descrizione particolareggiata che segue e dai disegni annessi, forniti a puro titolo di esempio esplicativo e non limitativo, in cui:

- la figura 1 rappresenta una vista schematica del dispositivo laser secondo l'invenzione, proiettata sul piano di polarizzazione p della radiazione di cavità;
- la figura 2 rappresenta il valore delle perdite per aberrazione termica di tre materiali laser impiegabili nel dispositivo laser di figura 1, al variare della potenza di pompaggio assorbita;
- la figura 3 rappresenta il valore della focale termica di tre materiali laser impiegabili nel dispositivo laser di figura 1, al variare della potenza di pompaggio

Ing. Giorgio CROVINI

assorbita;

- la figura 4 rappresenta il valore delle perdite per aberrazione termica del materiale laser Nd:GVO, al variare del drogaggio, in schema di pompaggio a singolo e doppio passo;

- la figura 5 rappresenta il valore della focale termica del materiale laser Nd:GVO, al variare del drogaggio, in schema di pompaggio a singolo e doppio passo;

- la figura 6 rappresenta la tipica dipendenza delle perdite diffrattive per aberrazione termica dal rapporto di sovrapposizione tra il fascio di pompa e il fascio laser

L'idea inventiva consiste sostanzialmente nell'utilizzo di una struttura di cavità e di elementi ottici che riducano al minimo le perdite ottiche del risonatore alla lunghezza d'onda infrarossa e ne consentano il funzionamento ad altissima efficienza, e nella stabilizzazione delle prestazioni grazie al controllo termico del sistema; detta lunghezza d'onda infrarossa costituisce la cosiddetta lunghezza d'onda fondamentale, in rapporto alla lunghezza d'onda della "seconda armonica" nel visibile che viene ricavata nel processo di ICSHG. Come sarà mostrato nel seguito, ciò conferisce un'elevata efficienza del processo di ICSHG senza aggiungere complessità ulteriori al sistema.

Noti i modelli matematici che descrivono il fenomeno di ICSHG, si può osservare come l'efficienza del processo di conversione dipenda strettamente e fortemente dalla percentuale di perdite della cavità laser alla lunghezza d'onda fondamentale di funzionamento infrarossa. Per perdite ottiche si intenda la percentuale di potenza circolante alla lunghezza d'onda fondamentale che viene dispersa in un giro di cavità, non comprendendo tale valore la percentuale di potenza circolante convertita in seconda armonica. Tali perdite competono con il processo stesso di ICSHG nell'estrazione di

Ing. Giorgio CROVINI  
*Giorgio Crovini*

potenza dalla cavità; infatti, in una tipica cavità lunga alcune decine di cm, la percentuale della potenza infrarossa circolante in cavità convertita in seconda armonica è spesso dello stesso ordine di grandezza della percentuale che viene dispersa a causa delle perdite diffrattive della cavità stessa. Se fenomeni di perdita ottica deprivano il risonatore di potenza circolante, quest'ultima non è più disponibile per il processo di generazione di seconda armonica; la soluzione proposta provvede quindi, che il sistema laser non presenti perdite per la fondamentale, e accoppi all'esterno solo la seconda armonica generata.

Le perdite infrarosse dipendono principalmente da alcuni fattori concomitanti, sulla attenuazione dei quali si incentra il concetto alla base del dispositivo oggetto dell'invenzione:

- non perfetta riflettività degli specchi di cavità, e non perfetta trasmissione degli elementi ottici all'interno della cavità (per esempio rivestimenti dielettrici antiriflesso del cristallo laser e del cristallo non lineare);
- imperfetta trasparenza del cristallo laser e del cristallo non lineare alla fondamentale e alla seconda armonica;
- perdite per diffrazione del risonatore laser;
- emissione non polarizzata del mezzo attivo;
- perdite per aberrazione termica indotte dal pompaggio, nella propagazione del modo laser attraverso il mezzo attivo;
- eventuali perdite nella propagazione attraverso il mezzo attivo dovute a fenomeni parassiti (per esempio excited state absorption)

Il dispositivo secondo l'invenzione comprende una struttura di cavità miniaturizzata, comprendente cristalli e mezzi di termostatazione che consentono di minimizzare le perdite infrarosse e massimizzare l'efficienza ottica del sistema operante il processo di

Ing. Giorgio CROVINI  
*Giorgio Crovini*

ICSHG, comportando nel frattempo la desiderata flessibilità nella generazione di lunghezze d'onda differenti, e la compattezza, semplicità, robustezza ed efficienza energetica della testa laser.

In figura 1 è mostrato uno schema di principio di un dispositivo laser 71 secondo l'invenzione.

Detto dispositivo 71 comprende sostanzialmente una cavità laser 72, sulla quale incide un fascio di pompaggio 54 generato da un sorgente esterna 73.

In tale cavità laser 72 o risonatore il fascio di pompaggio 54 incontra inizialmente uno specchio di pompaggio 30 dotato di una faccia 32 trasparente al pompaggio e di una faccia riflettente 31 verso l'interno della cavità 72, quindi incontra una prima faccia 11 di un cristallo attivo 10. Nel cristallo attivo 10 il fascio di pompaggio 54 genera un fascio laser 52 a lunghezza d'onda fondamentale che fuoriesce da una seconda faccia 12 del cristallo attivo 10 e incide su uno specchio dicroico di ripiegamento 33 che riflette il fascio 52 verso l'interno della cavità 72 tramite una faccia 34. Il fascio 52, deflesso dallo specchio dicroico 33, incide quindi sulla prima faccia 21 di un cristallo non lineare 20, uscendone attraverso una seconda faccia 22 per essere riflesso dalla faccia 37 di uno specchio di fondo 36. Detti specchi 30, 33, 36 definiscono un asse ottico della cavità 72, cioè un asse ottico 50 di propagazione del fascio laser 52 a lunghezza d'onda fondamentale. Tale fascio laser 52 oscilla dunque nella cavità 72 dallo specchio di pompaggio 31, attraverso lo specchio dicroico 33, fino allo specchio di fondo 36, quindi di nuovo passando sullo specchio dicroico 33, allo specchio di pompaggio 31. Durante tale oscillazione, nei passaggi del fascio laser 52 a una frequenza  $\omega$  attraverso il cristallo non lineare 20, si genera per generazione di seconda armonica un fascio visibile 51 a frequenza duplicata  $2\omega$  rispetto alla frequenza  $\omega$  del fascio laser 52 infrarosso, che



Ing. Giorgio CROVINI

fuoriesce attraverso lo specchio diecrico 33, attraversandone la faccia 34 e una faccia 35 rivolta verso l'esterno della cavità 72.

L'asse ottico 50 della cavità 72 infrarossa, come si può ben apprezzare dalla figura 1, assume perciò un aspetto a "v" o a "L" a seconda dell'angolo di incidenza del fascio laser 52 sullo specchio diecrico 33, detto angolo d'incidenza potendo variare in un campo compreso tra  $0.1^\circ$  e  $80^\circ$ . L'asse ottico 50 del risonatore 72 giace in un piano, rispetto al quale si definiscono delle polarizzazioni "p" e "s" del fascio laser 52 propagantesi in direzione parallela a detto piano: con "p" è indicata una direzione di polarizzazione parallela a detto piano e perpendicolare all'asse ottico, con "s" è indicata una direzione perpendicolare a "p" e perpendicolare all'asse ottico 50.

Gli specchi 30, 33, 36 della cavità 72 costituiscono, preferibilmente, elementi ottici separati dai cristalli 10 e 20, per garantire la miglior realizzazione possibile dei rivestimenti dielettrici, e la totale indipendenza di allineamento della cavità 72 rispetto all'allineamento del cristallo non lineare 20 per il phase matching.

Gli specchi 30, 33 e 36 hanno funzioni differenti, ma sono accomunati dalla caratteristica che le facce 31, 34, 37 godono di elevatissima riflettività alla lunghezza d'onda fondamentale del fascio laser 52 secondo la polarizzazione s. La scelta della lunghezza d'onda fondamentale operativa del laser avviene tramite l'opportuna scelta dei rivestimenti dielettrici che costituiscono le facce 31, 34, 37 degli specchi 30, 33, 36 e le facce 11, 12, 21, 22 dei cristalli 10 e 20. Un valore ottimale e realizzabile della riflettività delle facce 31, 34, 37 degli specchi 30, 33, 36 può essere  $R > 99.95\%$  impiegando per esempio rivestimenti dielettrici realizzati con tecniche di sputtering. La scelta di rivestimenti siffatti consente di ottenere, per un giro completo della cavità del fascio laser 52 a polarizzazione s, una perdita complessiva di solo 0.2%.

Il dispositivo 71 comprende un basamento strutturale 45 di rame o altro materiale

Ing. Giorgio CROVINI  
*Geo. Crovini*

metallico o ceramico con buone caratteristiche di conduzione del calore, sul quale sono costruiti i rimanenti elementi del dispositivo 71; il lato della struttura 45 sottostante alla cavità laser 72 è realizzato a mo' di piano ben levigato per consentire un ottimo scambio termico con un elemento a temperatura regolata, come, per esempio, una cella di Peltier con controllo attivo della temperatura o uno scambiatore ad acqua termoregolata.

Gli specchi 30, 33 e 36 sono montati su rispettivi supporti 41 42 e 44 che hanno buon contatto termico con il basamento strutturale 45, così che l'intera cavità 72 risulta far parte di un medesimo circuito termico e stabilizzata in temperatura: si ottiene così una maggiore stabilità meccanica e insensibilità al disallineamento provocato dal variare delle condizioni climatiche esterne, nonché una accentuata stabilità in frequenza della cavità.

Altre caratteristiche ottiche desiderabili per gli specchi sono:

-lo specchio di pompaggio 30 può avere la sua faccia 31 riflettente trattata con un opportuno strato antiriflesso alla lunghezza d'onda di pompaggio (tipicamente 800-808nm o 879nm) e antiriflesso a una o più delle lunghezze d'onda caratteristiche del cristallo laser 10, ove il sistema debba operare ad una lunghezza d'onda svantaggiata per sezione di emissione stimolata: se, per esempio, il laser opera a 912 nm di lunghezza d'onda. fondamentale, lo specchio di pompaggio 30 può essere trattato in modo da essere antiriflesso a 1064 e 1340 nm per garantire l'estinzione dell'azione laser o della superfluorescenza di tali lunghezza d'onda in quanto fenomeni competitivi del guadagno; lo specchio di pompaggio 30 può avere la faccia 31 anche trattata anti riflesso alla lunghezza d'onda di pompa e/o ad una o più lunghezza d'onda del materiale attivo di cui si desidera impedire la risonanza. Una o ambo le facce di tale lo specchio di pompaggio 30 possono essere piane o curve; nella realizzazione del dispositivo, la faccia 31 è preferibilmente concava, per produrre un modo laser fondamentale più focalizzato nel cristallo non lineare 20 che nel materiale attivo 10. Lo specchio di pompaggio 30 funge

Ing. Giorgio CROVINI  
Rep. W

da finestra di lancio per il fascio di pompaggio 54 nel cristallo attivo 10, ed è in grado nel contempo di riflettere totalmente il fascio laser 52 fondamentale. In una diversa realizzazione, lo specchio di pompaggio 30 può essere direttamente deposto sulla faccia del cristallo attivo 11, ove questo accorgimento non pregiudichi il conseguimento di perdite limitate per la radiazione circolante, ad esempio quando la potenza di pompa sia limitata entro i 5-10W, o qualora il cristallo attivo 10 sia poco sensibile alla deformazione termica, ad esempio quando si utilizzino Nd:YLF o altri fluoruri. In ogni caso, si richiede per questo strato una caratteristica di riflettività pari a quella sopra descritta per un elemento discreto.

-lo specchio dicroico 33 di ripiegamento ha la faccia 34 dotata di un rivestimento che è anche antiriflettente rispetto alla seconda armonica 51, polarizzata "p" (parallela al piano in cui giace l'asse ottico). La bassa riflettività,  $R < 2\%$  per esempio, alla frequenza della seconda armonica permette di estrarre il fascio visibile 51 generato nel cristallo 20 dalla cavità 72 senza che questo debba incidere sul cristallo attivo 10. La faccia 34 può essere anche anti riflesso a una o più delle lunghezze d'onda laser di cui non si desidera la risonanza. La faccia 35 del cristallo 20 può essere dotata di uno strato anti riflesso per la seconda armonica uscente, polarizzata "p". Tutti i rivestimenti dielettrici dello specchio dicroico 33 sono realizzati in funzione del preciso angolo di incidenza, a cui dovrà essere posizionato entro una tolleranza tipica di  $\pm 1^\circ$ . Lo specchio dicroico 33 può essere realizzato con una o entrambe le facce piane o curve;

-lo specchio di fondo 36 è dotato sulla faccia 37 riflettente di uno strato dielettrico altamente riflettente anche alla seconda armonica (53) polarizzata "p" ( $R > 99,8\%$ ), nonché eventualmente antiriflesso a lunghezza d'onda laser di cui non si desidera la risonanza. Una faccia posteriore 38 dello specchio di fondo 37 può essere dotata di uno strato dielettrico anti riflesso per la lunghezza d'onda del fascio laser 52 di cui non si

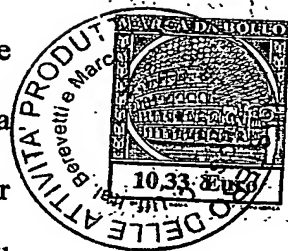
Ing. Giorgio GROVINI  
*Ge. Grovini*

desidera la risonanza. Lo specchio di fondo 36 può essere realizzato con una o entrambe le facce piane o curve.

E' ovviamente possibile aumentare o diminuire il numero di specchi o, in generale, il numero delle ottiche presenti nel risonatore 72 per ottenere disegni di cavità più compatti o efficienti, fintanto che i nuovi elementi introducano perdite ottiche trascurabili. In una possibile realizzazione alternativa, per esempio, possono essere impiegati due soli specchi, uno di pompa totalmente riflettente alla fondamentale e alla seconda armonica, uno di uscita altamente riflettente alla fondamentale e antiriflesso per la seconda armonica, permettendo a parte della seconda armonica di attraversare il materiale attivo prima di uscire dalla cavità.

La lunghezza della cavità 72, intesa come distanza di propagazione della luce fondamentale tra lo specchio di pompaggio 30 e lo specchio di fondo 36 è tale da costituire una cavità miniaturizzata. Nel seguito della descrizione con l'espressione 'cavità miniaturizzata' si intenderà una cavità la cui lunghezza non superi dieci volte la somma delle lunghezze dei cristalli 10 e 20 inclusi nel risonatore 72.

Poiché le perdite diffrattive di una cavità risonante in generale crescono all'aumentare della lunghezza dello stesso, la scelta di una cavità miniaturizzata vantaggiosamente permette di ridurre sensibilmente tali perdite fino a raggiungere valori trascurabili rispetto agli altri elementi di perdita del risonatore; inoltre, la scelta di una cavità miniaturizzata consente di realizzare un risonatore estremamente compatto con lunghezze tipiche di 5-10 cm e con un volume ben al di sotto dei 50 cm<sup>3</sup>. Tali dimensioni e volumi sono confrontabili, per esempio con quelle di un *package* di alcuni dispositivi elettronici e non ritrovabili nello stato dell'arte in un sistema laser a stato solido e componenti discreti con potenze di emissione intorno o superiori al watt, caratterizzato da robustezza strutturale, e che, soprattutto, può essere facilmente sigillato in atmosfera



Ing. Giorgio CROVINI  
*Geo. Crovini*

inerte, e controllato in temperatura.

E' da precisare che con l'espressione a 'componenti discreti', si vuole identificare una cavità differente da microcavità laser realizzate tramite processi di ottica integrata.

Il fascio di pompaggio 54 è provvisto, come detto, da una sorgente esterna 73, che può essere costituita da un array di diodi laser di potenza accoppiato in fibra ottica, e che viene focalizzata longitudinalmente nel cristallo attivo 10 tramite una opportuna ottica 39 anteposta allo specchio di pompaggio 30. In una implementazione alternativa il fascio di pompaggio 54 può provenire da una sorgente a diodo laser situata sul basamento strutturale 45 stesso. La lunghezza della cavità 72 viene scelta anche in funzione della dimensione del fascio di pompaggio 54 nel cristallo attivo 10, per aumentare l'efficienza dell'azione laser alla lunghezza d'onda fondamentale tramite una opportuna sovrapposizione tra il modo laser e il fascio di pompaggio 54; preferibilmente, la lunghezza, insieme ad altri parametri del risonatore 72 può essere scelta per consentire il funzionamento del laser nel modo  $TEM_{0,0}$ , con un fascio al limite di diffrazione, per massimizzare l'efficienza del processo di ICSHG.

In prossimità dello specchio di pompaggio 30, e intersecante l'asse ottico di cavità 50 e la direttrice del fascio di pompaggio 54, si trova il cristallo laser 10, che può essere realizzato attraverso un cristallo di  $Nd:GdVO_4$ , tagliato secondo l'asse cristallografico  $a$  e orientato in modo che il suo asse cristallografico  $c$  coincida con l'asse di polarizzazione "s" della cavità 72. Il cristallo laser 10 alloggia in un montaggio 40 di rame o altro materiale buon conduttore di calore, a sua volta ancorato al basamento strutturale 45 per garantire una buona trasmissione del calore. Tra il cristallo 10 ed il montaggio 40, strati di adattamento in foglia di Indio o altri materiali conduttori di calore formano un'efficiente interfaccia termica.

Il cristallo laser 10 presenta le due facce 11 e 12 perpendicolari all'asse ottico 50

Ing. Giorgio CROVINI  
Fig. 4a

della cavità 72, lavorate otticamente e dotate di un rivestimento dielettrico con le seguenti proprietà:

-la faccia 11 prossima allo specchio di pompaggio 30 è anti riflesso alla lunghezza d'onda fondamentale infrarossa, con perdite possibilmente inferiori allo 0.1% e preferibilmente dell'ordine dello 0.05%, e possibilmente ad alta trasmissione per il fascio di pompaggio 54 che, attraversando la faccia 11, entra nel cristallo laser 10 pompandolo longitudinalmente.

-la faccia 12 opposta alla faccia 11 è anti riflesso alla lunghezza d'onda fondamentale infrarossa, con perdite possibilmente inferiori allo 0.1% e preferibilmente dell'ordine dello 0.05%.

In una versione preferita del dispositivo laser secondo l'invenzione, la faccia 12 è anti riflesso alla lunghezza d'onda fondamentale infrarossa, con perdite possibilmente inferiori allo 0.1% e preferibilmente dell'ordine dello 0.05%, e possibilmente ad alta riflettività per il fascio di pompaggio 54 che, non del tutto assorbito nel cristallo laser, può essere rimandato ad attraversare il cristallo laser 10 per un secondo processo di assorbimento lungo il canale di pompa realizzato nel primo passaggio. A questo scopo, il cristallo laser 10 deve trovarsi orientato nel risonatore con la faccia 12 perpendicolare o allineata entro  $2^\circ$  alla direzione del fascio di pompaggio 54, e la direzione di quest'ultimo sovrapporsi al meglio all'asse ottico del risonatore 50.

In prossimità dello specchio di fondo 36 è posto il cristallo non lineare 20 mediatore del processo di ICSHG. Il materiale scelto per il cristallo non lineare 20 è un LBO, cioè un cristallo di Triborato di Litio,  $\text{LiB}_3\text{O}_5$ , le cui caratteristiche sono note ad esempio dalla pubblicazione. *Chen et alii*, JOSA B, 6, 1989, p616 e segg.. Detto cristallo non lineare 20 è lungo 10-15mm, tagliato per phase matching di tipo I, critico, alla lunghezza d'onda operativa del dispositivo laser 71; alternativamente all'uso del materiale non lineare

Ing. Giorgio CROVINI  
*Ge*

LBO, è possibile utilizzare il cristallo non lineare YCOB o GdCOB, le cui proprietà sono compatibili a quelle enunciate per il Triborato di Litio.

Le facce 21 e 22 del cristallo non lineare 20, disposte a intersecare l'asse ottico di cavità 50, sono lavorate otticamente ed entrambe dotate di un rivestimento dielettrico anti riflesso alla lunghezza d'onda fondamentale infrarossa, con perdite possibilmente inferiori allo 0.1% e preferibilmente dell'ordine dello 0.05%, e contemporaneamente anti riflesso per la seconda armonica con perdite possibilmente inferiori allo 0.5% e preferibilmente dell'ordine dello 0.05%.

Il cristallo 20 riceve il fascio laser 52 alla lunghezza d'onda fondamentale e polarizzato "s", attraverso la faccia 21 e, solo se angolato correttamente rispetto all'asse di propagazione di cavità 50, può trasformare due fotoni infrarossi in un fotone visibile, realizzando la duplicazione di frequenza. La radiazione infrarossa residua appartenente al fascio laser 52 e la radiazione visibile generata 51 escono dal cristallo non lineare 20 attraverso la faccia 22, e vengono entrambe riflesse, dallo specchio di fondo 36, nuovamente all'interno del cristallo 20 lungo il cammino di andata. Nel cristallo non lineare 20, il processo di conversione continua nel secondo attraversamento, almeno in parte stimolato in modo coerente dalla seconda armonica generata al primo passo. Il residuo infrarosso del fascio laser 52 ed il fascio visibile 51 escono dalla faccia 22, ed il fascio visibile 51 generato nei due passaggi viene quasi totalmente estratto dalla cavità tramite lo specchio diecrico 33. Il residuo infrarosso del fascio laser 52 viene invece riflesso dallo specchio diecrico 33 nel cristallo attivo 10, per essere amplificato fino al valore iniziale.

Con l'intera struttura della cavità 72 ancorata ad una temperatura prefissata (con un'accuratezza tipica migliore di  $0.1^{\circ}\text{C}$  rispetto alla temperatura nominale impostata o setpoint), il cristallo non lineare 20 viene orientato in cavità fino a massimizzare la

Ing. Giorgio CROVINI  
*py. G. C.*

conversione di seconda armonica; poiché tale orientazione è sensibile alla temperatura del cristallo, un montaggio 43 che alloggia il cristallo non lineare 20 di  $\text{LiB}_3\text{O}_5$ , realizzato in un materiale buon conduttore di calore, come rame, alluminio o altri, e al quale il cristallo 20 stesso viene vincolato per mezzo di materiali di interfaccia termica come fogli di Indio o equivalenti conduttori termici, viene fissato con un buon contatto termico al basamento strutturale 45 stabilizzando effettivamente la temperatura del cristallo 20 ed agganciandola alla temperatura del basamento 45. Come già accennato in precedenza agganciare alla temperatura del basamento 45 un elemento, in particolare il cristallo non lineare 20 attraverso il suo montaggio 43, significa che l'evoluzione termica del cristallo

non lineare 20 è legata a quella del basamento 45 e quindi non sono necessarie regolazioni indipendenti e riscaldatori e/o raffreddatori indipendenti per ottenere la stabilizzazione di temperatura. E' chiaro tuttavia che, a seconda delle resistenze e capacità termiche degli elementi agganciati al basamento 45 le temperature stabilizzate raggiunte potranno essere differenti, anche se la loro evoluzione rimane sostanzialmente correlata attraverso il basamento 45.

Nella fase di messa a punto del dispositivo laser 71, si possono imporre piccole variazioni della temperatura del basamento 45 attorno al valore di setpoint per ottimizzare ulteriormente il processo stesso di ICSHG: con questa operazione, si sfrutta la piccola variazione differenziale di indice di rifrazione rispetto alla temperatura per ottenere un phase matching ancora più accurato. A seguito di questa procedura, l'intera cavità 72, compresi gli elementi del risonatore e il cristallo laser, risulta termostata alla temperatura che garantisce il processo ottimo di ICSHG. In questa configurazione, il sistema laser opera correttamente solo quando la cavità 72 viene termostata al valore prefissato. Alternativamente, ove il sistema richieda temperature differenti per il cristallo laser ed il cristallo non lineare, o la temperatura operativa del cristallo non lineare 20



Ing. Giorgio GROVINI  
*[Signature]*

debba essere regolata con migliore precisione dinamica rispetto a quella del basamento 45, la struttura di cavità può essere alterata dotando il cristallo non lineare 20 di un dispositivo di termoregolazione autonomo addizionale come un riscaldatore, o una cella di Peltier che utilizzi come pozzo termico il basamento 45 del sistema, ed imponga rispetto a questo un differenziale prefissato di temperatura. Sdoppiando i sensori di temperatura, rispettivamente provvedendone uno per il solo cristallo non lineare 20 di LBO e uno per il basamento, risulta così possibile mantenere agganciate le temperature dei due cristalli, attivo 10 e non lineare 20, pur impostandole a valori diversi.

La cavità laser 72 descritta è in grado di generare con grande efficienza un fascio laser visibile; in particolare si riscontra la possibilità di trasformare più del 20% della potenza ottica di pompa in potenza del fascio laser visibile. Per esempio, 2.5W di radiazione a 670nm di lunghezza d'onda (rosso) sono generati utilizzando 9.2W di pompa assorbita, e 4.5W di radiazione a 532nm di lunghezza d'onda (verde) sono generati utilizzando meno di 20W di pompa assorbita.

La scelta di materiali attivi quali  $\text{Nd}^{3+}:\text{GdVO}_4$  (Ortovanadato di Gadolinio, drogato Neodimio, detto anche Nd:GVO), Nd:YLF (Fluoruro di Ittrio e Litio, drogato Neodimio) o eventualmente a Nd:YVO<sub>4</sub> (Ortovanadato di Ittrio, drogato Neodimio) è motivata dagli elementi descritti nel seguito, e più in particolare, dall'originale e innovativo metodo di selezione del materiale attivo secondo il criterio di minimizzazione delle perdite di origine termica, pur preservando l'elevato guadagno laser, poiché dette perdite termiche rappresentano la componente più importante di accoppiamento parassita della radiazione fondamentale.

I materiali citati emettono luce laser linearmente polarizzata; questo elemento è fondamentale, dal momento che solo una precisa polarizzazione lineare della fondamentale subisce il processo di SHG in un cristallo non lineare. Un materiale con

Ing. Giorgio CROVINI  
*Giorgio Crovini*

questa caratteristica non richiede l'inserzione di un polarizzatore in cavità (non aggiungendo così perdite di Fresnel supplementari) e soprattutto non risente di perdite per depolarizzazione di origine termo-meccanica, come accade, per esempio, con l'uso di Nd:YAG combinato con un polarizzatore in cavità (fenomeno di birifrangenza termica).

Il Nd:GVO, Nd YLF e Nd:YVO dispongono di intense righe di emissione attorno a 0.9, 1, 1.3  $\mu\text{m}$  di lunghezza d'onda, adatte a generare per ICSHG luce blu, verde e rossa, ed sono ottimamente trasparenti alle lunghezze d'onda fondamentali (tranne che nelle transizioni attorno a 900nm), ma discretamente assorbenti in alcune lunghezze d'onda visibili, per cui risulta preferibile separare la seconda armonica tramite lo specchio diecrico 33 prima che giunga al cristallo laser 10. I fenomeni parassiti di assorbimento sono molto limitati per tutte le transizioni di fondamentale.

Dunque tali materiali ad alto guadagno laser, adeguati alla ICSHG, sono particolarmente adatti a realizzare una configurazione di guadagno a bassa aberrazione termica per il modo di cavità, per alte potenze di pompa assorbite.

Il fenomeno delle perdite per aberrazione associate alla "lente termica" è ben noto e descritto dalla letteratura. Un materiale attivo che assorba un fascio di pompaggio di sezione confrontabile alla sezione del modo di cavità, presenta alla propagazione del modo di cavità al suo interno un profilo trasversale di temperatura e variazione di indice di rifrazione approssimativamente parabolico con code approssimativamente logaritmiche. Mentre la componente parabolica ha l'effetto di una lente ("lente termica") la componente logaritmica genera perdite per aberrazione dei fronti di fase sul modo laser. L'entità di tali perdite per potenze di pompa comprese tra alcuni W e alcune decine di W è molto elevata, e può rappresentare il contributo di perdita ottica maggiore in tutta una cavità laser per ICSHG. Applicando modelli matematici di recente sviluppo quali quelli descritti nei documenti. *Y.F. Chen et al.*, IEEE J. of Quantum Electron. 33, 1424-

Ing. Giorgio CROVINI  
*Giorgio Crovini*

1429, 1997, e Agnesi et al. in Opt.Comm.212, 371-376, 2002, è possibile stimare l'entità delle perdite per aberrazione del fronte di fase per alcuni materiali attivi particolarmente interessanti quali; per esempio non limitante, Nd:YVO, Nd:GVO, Nd:YLF. La figura 2 rappresenta un esempio di tale stima al variare della potenza di pompa assorbita nel cristallo, e ipotizzando in tutti i tre casi una lunghezza del cristallo pari a 9mm con un assorbimento complessivo della luce di pompa incidente pari al 90% (situazione di pari carico termico per unità di lunghezza).

Nel calcolo formulato a titolo esemplificativo si ipotizza un raggio  $W_p$  del fascio di pompaggio pari a 0.3mm e una dimensione del modo laser pari a 0.8  $W_p$ . Risulta chiaramente che il materiale con perdite per aberrazione nettamente inferiori è il Nd:YLF, che tuttavia risulta svantaggiato nell'utilizzo pratico da un basso indice di rifrazione (che non permette di confinare efficacemente il fascio di pompaggio), ma soprattutto da cattive proprietà termo-meccaniche, che ne mettono a rischio l'uso con elevate potenze di pompa assorbite. Sperimentalmente si verifica che l'analisi numerica tende invece a sopravvalutare il comportamento del Nd:GdVO<sub>4</sub> rispetto al Nd:YVO<sub>4</sub> tradizionalmente utilizzato per applicazioni di ICHSG. Utilizzando questi due materiali in un confronto a pari condizioni sperimentali, la differenza nella quantità di perdite per aberrazione termica non sembra marcata come previsto dai risultati numerici.

L'entità molto contenuta delle perdite riportata in figura 2 presuppone l'utilizzo di un drogaggio contenuto (circa 0.3% at. Nd<sup>3+</sup>) ottimizzato per la riduzione delle perdite per aberrazione dei fronti di fase; si osserva anche che l'entità delle perdite dipende fortemente dai parametri impiegati, e può facilmente peggiorare anche di un ordine di grandezza con una scelta inopportuna dei parametri di progetto. Quando si impieghi uno schema di pompaggio in due passi (che consente, a parità di lunghezza del cristallo e potenza totale assorbita, di diminuire il drogaggio atomico di Nd<sup>3+</sup>) si possono ottenere

Ing. Giorgio CRÒVINI  
19/10/2011

perdite per aberrazione in assoluto molto basse. La figura 4 mostra la dipendenza delle perdite per aberrazione termica dal drogaggio del cristallo di Nd:GdVO<sub>4</sub>, a parità di potenza di pompa assorbita (20W), in singolo e in doppio passo di pompa (aumentando quindi la lunghezza del cristallo al calare del drogaggio, e, per ogni drogaggio, dimezzandola nell'ipotesi di doppio passo). Risulta chiaramente che la diminuzione del drogaggio comporta una diminuzione sensibile delle perdite; l'intervallo utile di drogaggio per il Nd:GdVO<sub>4</sub>, e parimenti per il Nd:YVO<sub>4</sub>, in questa applicazione va da circa 0.05% a 0.6%at. Nd<sup>3+</sup>, a seconda delle caratteristiche proprie della transizione laser impiegata, e della qualità spaziale del fascio di pompaggio impiegato.



La figura 6 mostra come l'entità delle perdite diffrattive dovute ad effetti termici dipenda dalle caratteristiche di sovrapposizione del modo laser oscillante con il fascio di pompaggio; in particolare, la figura mostra un andamento qualitativo per il cristallo Nd:GVO e Nd:YLF, al variare del rapporto tra  $w_g$ , raggio gaussiano del modo fondamentale TEM<sub>0,0</sub> e  $W_{p0}$ , raggio equivalente del fuoco di pompaggio, nel cristallo; nell'esempio,  $W_{p0} = 0.3\text{mm}$ , e la potenza di pompa assorbita è 20W. Risulta anche evidente come il valore delle perdite per aberrazione di origine termica che il modo fondamentale TEM<sub>0,0</sub> subisce nell'attraversamento del materiale attivo decresca con l'aumentare del valore di  $W_{p0}$ ; esperimenti condotti dalla Richiedente mostrano chiaramente che, utilizzando il materiale attivo Nd:GdVO<sub>4</sub>, risulta possibile sfruttare valori molto contenuti del rapporto  $w_g/W_{p0}$  (tra 0.7 e 1) pur oscillando il risonatore sul solo modo fondamentale TEM<sub>0,0</sub>. Nelle stesse condizioni, il Nd:YVO<sub>4</sub>, caratterizzato da un guadagno laser superiore, produce una oscillazione leggermente multimodale, meno indicata per il processo di ICSHG. Rendendo possibile la generazione efficiente di un fascio TEM<sub>0,0</sub> con un valore inferiore delle perdite per aberrazione, l'uso di Nd:GVO può ritenersi vantaggioso rispetto all'uso di Nd:YVO nel dispositivo oggetto dell'invenzione.

Ing. Giorgio CRÖVINI

Note le caratteristiche del fascio di pompaggio, risulta possibile determinare la geometria di pompaggio, il tipo, la lunghezza e il drogaggio del materiale attivo, la struttura ottica e la lunghezza della cavità miniaturizzata che rendano minime le perdite ottiche per aberrazione di origine termica.

Ove il fascio di pompaggio abbia alta qualità spaziale o potenza contenuta entro 10W circa, è possibile utilizzare in alternativa al Nd:GdVO<sub>4</sub> e Nd:YVO<sub>4</sub> il Nd YLF, riducendo il valore totale delle perdite nella cavità risonante; inoltre, è possibile, in tutti i casi, ridurre ulteriormente le perdite per aberrazione, di origine termica, riducendo drasticamente il calore depositato nel materiale attivo dal fascio di pompaggio, tramite l'impiego di luce di pompa con lunghezza d'onda nella banda 860-890 nm invece della banda convenzionale 790-820 nm; infatti, il calore dissipato nel cristallo proviene principalmente dal cosiddetto "difetto quantico", ovvero dalla differenza energetica tra un fotone di pompa e il fotone laser che questo alimenta, che, utilizzata per transizioni energetiche di tipo non radiante, viene dispersa in calore all'interno della regione pompata. Il difetto quantico per la transizione a 1064nm, pompata a 808nm equivale a  $1 - 808/1064 = 0.24$ . Pompando a 879nm, il difetto si riduce a  $1 - 879/1064 = 0.17$ , ovvero a circa il 70% del caso precedente.

Nelle figure 3 e 5 (in comparazione tra i diversi materiali, e, nel caso di Nd:GVO, con singolo o doppio passo di pompa e con drogaggio variabile), sono riportati andamenti qualitativi della focale termica di Nd:GdVO<sub>4</sub>, Nd:YLF e Nd:YVO<sub>4</sub> in condizioni di pompaggio multiwatt; il potere diottrico della lente termica non è in alcun caso sufficiente a inficiare la stabilità di un risonatore ottico miniaturizzato.

La scelta del materiale non lineare LBO si basa su alcune considerazioni riportate nel seguito:

-la trasparenza è tra le migliori disponibili per un cristallo non lineare, e si estende

Ing. Giorgio CROVINI  
*Giorgio Crovini*

da 160nm a 2600nm di lunghezza d'onda; questo permette di contenere al massimo le perdite di assorbimento all'interno del cristallo, sia per la fondamentale, sia per la seconda armonica, secondo l'indicazione principale dell'invenzione di minimizzare le perdite ottiche per la fondamentale, e consentendo l'estrazione totale della seconda armonica generata;

-le proprietà del materiale sono ottime per il processo di ICSHG, con un alto coefficiente non lineare, alta accettanza angolare e basso walk-off, alta soglia di danneggiamento, alta resistenza ai fattori ambientali (scarsa igroscopicità), assenza di danneggiamento fotorifrattivo (fondamentale per applicazioni di alta potenza media nelle quali cristalli altrove vantaggiosi come, per esempio, il KTP risultano inaffidabili), possibilità di ottenere phase matching su tutto lo spettro interessante di lunghezze d'onda (da 0.55 a 2.6micron di lunghezza d'onda della fondamentale) utilizzando phase matching di tipo I, in cui due fotoni fondamentali polarizzati su uno degli assi principali del cristallo vengono convertiti in un fotone di seconda armonica polarizzato nell'asse perpendicolare.

E' importante osservare che, sebbene lo LBO non fornisca le prestazioni migliori in termine assoluto per il processo di ICSHG, esso è forse il più resistente cristallo non lineare per questo tipo di applicazione, ed è quindi la scelta migliore per un sistema laser cui venga richiesta affidabilità a lungo termine.

Un elemento innovativo consiste nella scelta di impiegare, per tutte le lunghezze d'onda fondamentali di interesse, il cristallo di LBO per il processo di SHG nello schema di duplicazione di tipo I, critico, ovvero dipendente dall'angolo. E' ben noto il vantaggio di impiegare, in un processo di SHG, un cristallo non lineare con phase matching *non critico*, ovvero non dipendente dalla distribuzione angolare del fascio fondamentale, e senza walk-off, ovvero lo sganciamento spaziale tra prima e seconda armonica nella

Ing. Giorgio CROVANI  
Pag. 10

percorrenza del cristallo, dovuto alla natura birifrangente del materiale.

In queste condizioni infatti, il fascio fondamentale può essere focalizzato fortemente nel materiale non lineare con intensità tali da rendere il processo di conversione altamente efficiente; anche la lunghezza del materiale non lineare non deve sottostare a particolari vincoli legati alla propagazione della fondamentale. E' altresì noto che nel cristallo LBO, il phase matching non critico di tipo I alle lunghezze d'onda principali del (per esempio non limitante) Nd:GdVO<sub>4</sub> di 912, 1064 e 1340nm può essere ottenuto portando il cristallo alle temperature (approssimative) di 250°C, 160°C, 0°C. Tali temperature richiedono però la presenza in cavità di una cella termoregolata alle temperature sopraindicate, coibentata (per minimizzare l'effetto di riscaldamento dei componenti circostanti), e, nel caso di 0°C, anche sigillata in atmosfera secca per impedire la condensa di vapor acqueo sulle superfici, quest'ultima caratteristica non essendo compatibile con la realizzazione di un risonatore compatto per limitare le perdite ottiche, e di un sistema energeticamente efficiente.

Si propone invece, per tutte le lunghezze d'onda fondamentali di interesse, l'uso di un cristallo di LBO in condizione di phase matching di tipo I critico, che può sempre essere raggiunto a temperatura ambiente, utilizzando un cristallo non lineare tagliato secondo direzioni specifiche rispetto agli assi cristallografici in base alla temperatura operativa prevista. Il fenomeno di walk-off del fascio fondamentale viene ridotto grandemente con una scelta opportuna della dimensione del modo di cavità all'interno del cristallo non lineare, in modo che l'angolo di walk-off resti contenuto all'interno della divergenza del fascio. Ciò comporta necessariamente che la lunghezza del cristallo non lineare (e dunque la quantità di effetto non lineare complessivo) sia scelta in funzione della focalizzazione desiderata. Con un'accurata progettazione della cavità risonante e della lunghezza del cristallo di LBO, l'efficienza di conversione in seconda armonica può

Ing. Giorgio CROVINI  
*Gay. Crovini*

così essere resa di poco inferiore a quella ottenibile con l'impiego di un cristallo di LBO in phase matching non critico.

La scelta di un phase matching di tipo I critico risulta particolarmente vantaggiosa per lunghezze d'onda fondamentali comprese tra 1.2 e 1.4 micron: in tale intervallo, il phase matching risulta spontaneamente quasi-non critico anche a temperatura ambiente con ovvi vantaggi nel processo di conversione.

Il basamento 45 termoregolato assolve a una molteplicità di funzioni fondamentali per il funzionamento efficiente del sistema laser, giustificandone l'originalità realizzativa. Esse possono essere riassunte nei vantaggi di seguito descritti.

La temperatura dell'intero basamento, e della sede del cristallo di LBO, viene stabilita a priori, e il cristallo di LBO in phase matching di tipo I critico viene allineato in base a tale temperatura, e mantenuto alla corretta temperatura operativa, entro un errore di  $0.1^{\circ}\text{C}$  o meno (garantendo la massima efficienza di conversione in seconda armonica); in particolare, il processo di regolazione della temperatura avviene in reazione negativa, con un sensore (NTC, sonda al platino o altri) posto in prossimità del cristallo di LBO stesso. Piccoli aggiustamenti del setpoint di temperatura consentono di ottimizzare il processo di ICSHG una volta allineato quasi ottimamente il cristallo.

Il basamento 45 termoregolato asporta il carico termico parassita all'interno del cristallo laser. Il cristallo laser è montato in un'apposita struttura termicamente conduttiva 40, in modo che le superfici laterali del materiale possano essere mantenute agganciate in temperatura al basamento. L'interfaccia termica tra il cristallo e il basamento è garantita da un opportuno materiale di adattamento come foglia di Indio o similari. Il basamento 45 asporta dal cristallo laser 10 la potenza di pompa che viene assorbita e convertita in calore attraverso i processi di diseccitazione termica. Anche la perdita di fluorescenza dal cristallo laser viene riassorbita dalle pareti della struttura, e



Ing. Giorgio CRÓVINI  
*Fig. 1*

asportata come calore nel processo di termoregolazione. Quando, in particolare, il laser operi a lunghezze d'onda nella regione 800-950nm, il livello energetico inferiore della transizione laser viene a collocarsi nel multipletto  $^4I_{9/2}$  comprendente il ground state energetico; di conseguenza, il livello inferiore della transizione viene popolato in funzione della temperatura assoluta del materiale, con l'insorgere di perdite per riassorbimento della luce laser in quella che comunemente viene indicata come una "transizione a quasi tre livelli". In tale caso, risulta benefico regolare l'intero basamento 45 ad una temperatura abbastanza bassa (per esempio 7-10°C) per ridurre le perdite dovute alla popolazione termica del ground state; il cristallo di LBO viene orientato per un corretto phase matching a questa temperatura.

Per conservazione dell'energia, tutta la potenza fornita al sistema che non venga trasformata in luce emessa dalla cavità, viene trasformata in calore all'interno del sistema stesso. Il basamento 45 provvede a smaltire il calore, mantenendo la temperatura dei componenti al suo interno costante e quanto più uniforme possibile.

I componenti ottici della cavità sono vincolati al basamento con strutture che conducono bene il calore: la cavità non subisce perciò nessun fenomeno di espansione termica rispetto alla condizione di regolazione originaria, con grande vantaggio nella conservazione dell'allineamento generale del risonatore e anche sulla stabilità in frequenza dell'emissione laser.

Precedenti osservazioni empiriche mostrano, inoltre, che la termoregolazione del cristallo laser e del cristallo non lineare, unitamente ad un favorevole allineamento del cristallo non lineare rispetto all'asse di cavità, entro la tolleranza angolare di phase matching, minimizzano i fenomeni di rumore nel processo di ICSHG, senza la necessità, a tale scopo, di ricorrere alla selezione di un singolo modo longitudinale; nel dispositivo secondo l'invenzione, il basamento termicamente conduttivo aggancia tra di loro le

Ing. Giorgio CRÒVINI  
*Giorgio Cròvini*

temperature dei due cristalli, laser 10 e non lineare 20, con una precisione nettamente superiore che nel caso di un controllo individuale delle reciproche temperature.

Dalla descrizione effettuata risultano pertanto chiare le caratteristiche della presente invenzione, così come chiari risultano i suoi vantaggi.

Vantaggiosamente, il dispositivo descritto genera fasci laser di potenza dell'ordine, o superiore, al watt con grande efficienza, superiore al 20% di conversione ottica/ottica, a lunghezze d'onda che potenzialmente coprono l'intero spettro visibile dal blu/violetto al rosso.

Inoltre vantaggiosamente, il dispositivo genera tali fasci utilizzando una struttura di cavità unificata, utilizzabile per tutte le lunghezze d'onda di interesse con la semplice sostituzione delle ottiche e dei cristalli secondo necessità. Per ottenere una lunghezza d'onda differente si possono cambiare i rivestimenti dielettrici, ovvero l'intero insieme di ottiche e cristalli, nonostante i materiali ottici restino invariati (es. Nd:GVO+LBO tipo I critico).

Ancora, vantaggiosamente, il dispositivo descritto raggiunge la piena funzionalità con l'utilizzo sinergico di una cavità a bassissime perdite, miniaturizzata, sigillata e completamente termostata, del materiale attivo Nd:GdVO<sub>4</sub> (o Nd:YLF o Nd:YVO<sub>4</sub>), e del cristallo non lineare LBO (o YCOB o GdCOB) con phase matching di tipo I critico.

E' chiaro che numerose varianti sono possibili per l'uomo del ramo al dispositivo laser pompato a diodi per la generazione di un fascio visibile di potenza, del tipo che comprende descritto come esempio, senza per questo uscire dai principi di novità insiti nell'idea inventiva, così come è chiaro che nella sua pratica attuazione le forme dei dettagli illustrati potranno essere diverse, e gli stessi potranno essere sostituiti con degli elementi tecnicamente equivalenti.

\* \* \* \* \*

Ing. Giorgio CROVINI  
*Geo. Crovini*

## RIVENDICAZIONI

1. Dispositivo laser pompato a diodi per la generazione di un fascio visibile di potenza, del tipo che comprende :

-una cavità laser (72) lineare miniaturizzata comprendente almeno i seguenti elementi ottici (30,33,36,10,20):

- mezzi riflettenti (30;33;36) altamente riflettenti a una lunghezza d'onda fondamentale di un fascio laser (52) generato da detta cavità (72), almeno uno di detti mezzi riflettenti (30) essendo attraversato da un fascio di pompaggio (54), almeno uno di detti mezzi riflettenti (36) essendo riflettente a detta lunghezza d'onda fondamentale e una lunghezza d'onda di seconda armonica (51) rispetto a detta lunghezza d'onda fondamentale e almeno uno di detti mezzi riflettenti (33) essendo altamente trasmissivo a detta seconda armonica (51) di detta lunghezza d'onda fondamentale;

-un materiale attivo (10) ad emissione polarizzata e con una configurazione di guadagno a bassa aberrazione termica per il modo di cavità, detto materiale attivo (10) essendo atto a generare detto fascio laser (52) ad una lunghezza d'onda fondamentale;

-un cristallo non lineare (20), all'interno di tale cavità (72) ;

caratterizzato dal fatto che

detto cristallo non lineare (20) è atto a generare una seconda armonica (51) di detta lunghezza d'onda fondamentale tramite phase matching di tipo I, critico e che

detta cavità (72) è associata a dei mezzi di termostatazione (45;41;42;43;44) per agganciare in temperatura detta cavità (72) e i suoi elementi ottici (30,33,36,10,20).

Ing. Giorgio CROVINI  
*Giorgio Crovini*

2. Un dispositivo secondo la rivendicazione 1, caratterizzato dal fatto che detta cavità (72) e i mezzi ottici (30,33,36,10,20) che comprende sono selezionati per minimizzare le perdite ottiche.
3. Un dispositivo secondo una delle rivendicazioni precedenti, caratterizzato dal fatto che dette perdite ottiche a detta lunghezza d'onda fondamentale sono minori del 2%.
4. Un dispositivo secondo una delle rivendicazioni precedenti, in cui dette perdite ottiche a detta lunghezza d'onda fondamentale per aberrazione termica sono minori di 1%.
5. Un dispositivo secondo una delle rivendicazioni da 1 a 4, caratterizzato dal fatto che il materiale attivo (10) è un cristallo di Nd:GdVO<sub>4</sub>.
6. Un dispositivo secondo una delle rivendicazioni da 1 a 4, caratterizzato dal fatto che il materiale attivo (10) è un cristallo di Nd:YLF.
7. Un dispositivo secondo una delle rivendicazioni da 1 a 4, caratterizzato dal fatto che il materiale attivo (10) è un cristallo di Nd:YVO<sub>4</sub>.
8. Un dispositivo secondo una delle rivendicazioni da 5 a 7, caratterizzato dal fatto che il cristallo non lineare è LBO.
9. Un dispositivo secondo una delle rivendicazioni da 5 a 7, caratterizzato dal fatto che il cristallo non lineare è YCOB o GdCOB.
10. Un dispositivo secondo una delle rivendicazioni precedenti, caratterizzato dal fatto che detto fascio visibile (51) è un fascio al limite della diffrazione, o TEM<sub>0,0</sub>.
11. Un dispositivo secondo una delle rivendicazioni precedenti caratterizzato dal fatto che il fascio di pompaggio (54) viene assorbito in due attraversamenti successivi del materiale attivo (10).



Ing. Giorgio CROVINI  
*[Signature]*

12. Un dispositivo secondo una delle rivendicazioni precedenti caratterizzato dal fatto che detti mezzi di termostatazione (45;41;42;43;44) per agganciare in temperatura detta cavità (72) e i suoi elementi ottici comprendono una struttura meccanica (45;41;42;43;44) associata a detta cavità (72)
13. Un dispositivo secondo la rivendicazione 12 caratterizzato dal fatto che detta struttura meccanica comprende un basamento strutturale (45), e degli elementi di supporto delle ottiche (41;42;43;44).
14. Un dispositivo secondo la rivendicazione 12 o 13 caratterizzato dal fatto che detti basamento strutturale (45) e elementi di supporto delle ottiche (41;42;43;44) sono realizzati in rame o altro materiale buon conduttore di calore e associati in contatto termico tra di loro.
15. Un dispositivo secondo una delle rivendicazioni da 12 a 14, caratterizzato dal fatto la temperatura del basamento strutturale (45) è regolata mediante un sistema attivo.
16. Un dispositivo secondo una delle rivendicazioni da 12 a 15 caratterizzato dal fatto che detta struttura meccanica (45;41;42;43;44) ha forma di contenitore contenente detta cavità (72) in maniera sigillata.
17. Un dispositivo secondo una delle rivendicazioni precedenti, caratterizzato dal fatto che detti mezzi di termostatazione (45;41;42;43;44) comprendono un dispositivo di termoregolazione autonomo addizionale per stabilizzare la temperatura del cristallo non lineare (20) in maniera autonoma e più precisa rispetto a quella degli altri elementi della cavità .
18. Un dispositivo secondo almeno una delle rivendicazioni precedenti caratterizzato dal fatto che i mezzi riflettenti (30;33;36) sono almeno in parte ottenuti tramite deposizioni riflettenti sul cristallo laser (10) e/o sul cristallo non lineare (20).

Ing. Giorgio CROVINI  
*Giorgio Crovini*

19. Metodo di generazione di un fascio laser visibile in una cavità laser (72) del tipo che prevede di inserire in detta cavità laser (72) un cristallo non lineare (20) per ottenere detto fascio laser visibile (51) tramite un'operazione di generazione di seconda armonica caratterizzato dal fatto di prevedere le seguenti operazioni:

- scegliere un cristallo non lineare (20) tagliato per phase matching di tipo I critico;
- allineare detto cristallo non lineare (20) a una temperatura prefissata dai mezzi di termostatazione (45) associati a detta cavità (72) ottenendo la condizione di phase matching
- ottimizzare la conversione in seconda armonica con ulteriori piccole regolazioni della temperatura intorno al valore prefissato.

20. Metodo secondo la rivendicazione 19 caratterizzato dal fatto che l'operazione di regolazione della temperatura avviene in reazione negativa rilevando il segnale di un sensore posto in prossimità del cristallo non lineare.

21. Metodo secondo la rivendicazione 19 o 20 caratterizzato dal fatto che prevede inoltre le operazioni di:

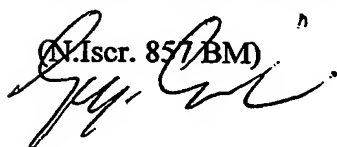
- ridurre il walk-off del fascio laser (52) fondamentale operando sulla dimensione del modo di cavità all'interno del cristallo non lineare (20), in modo da contenere l'angolo di walk-off all'interno della divergenza del fascio;
- scegliere la lunghezza del cristallo non lineare in funzione della focalizzazione desiderata.

Il tutto sostanzialmente come descritto ed illustrato e per gli scopi specificati.

\* \* \* \* \*

Bright Solutions Soluzioni Laser Innovative s.r.l.

p.i Ing. Giorgio Crovini

(N. Iscr. 857/BM)  




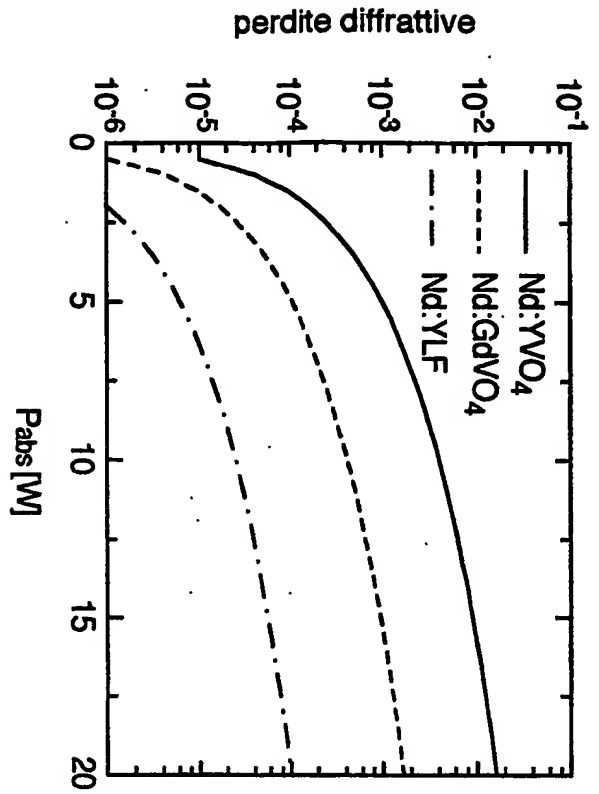


Fig. 2

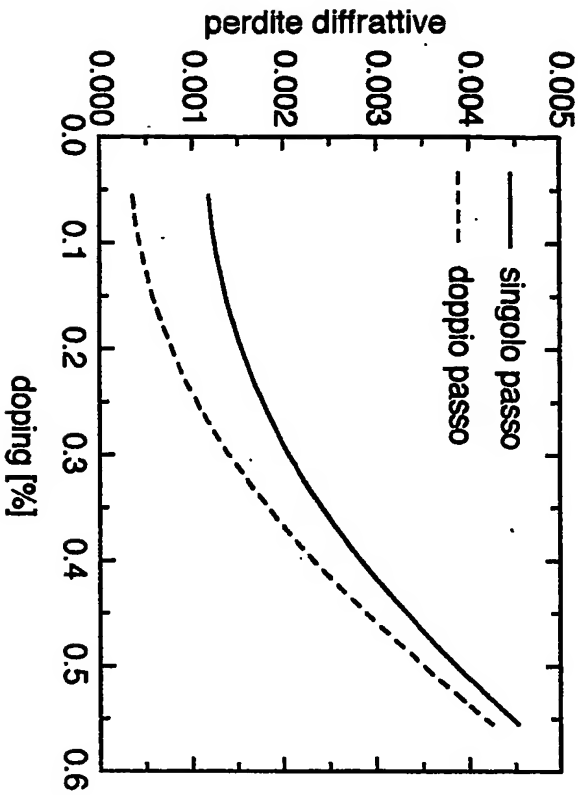


Fig. 4

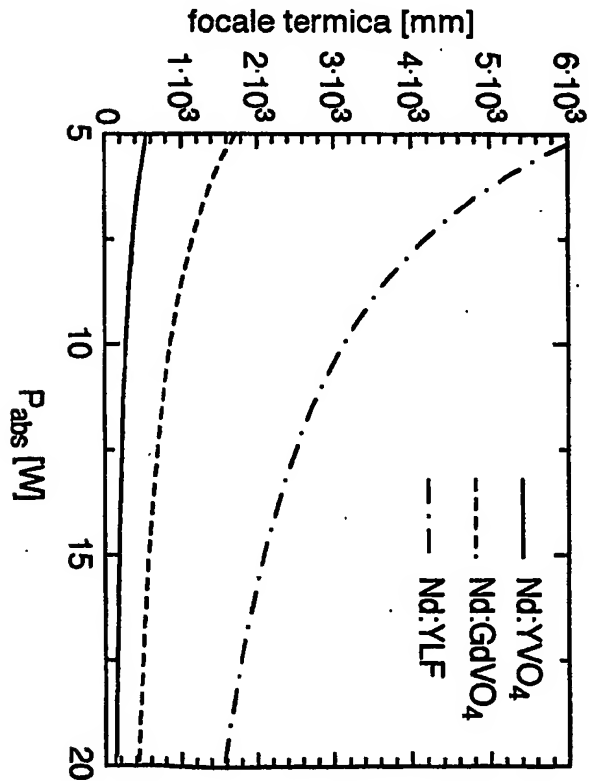


Fig. 3

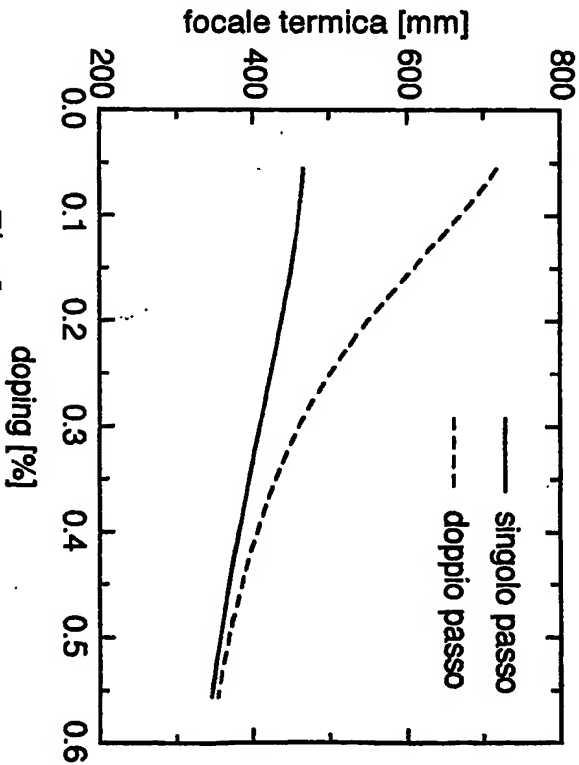


Fig. 5

Ing. Giorgio CROVINI



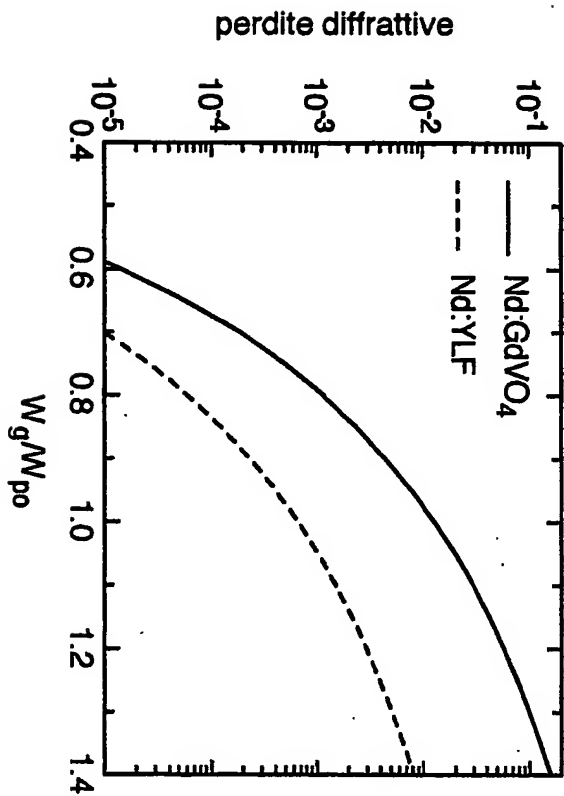


Fig. 6



CAMERA DI COMMERCIO  
INDUSTRIA ARTIGIANATO E AGRICOLTURA  
DI TORINO

Ing. Giorgio CROVINI

**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning  
Operations and is not part of the Official Record**

**BEST AVAILABLE IMAGES**

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- ☐ BLACK BORDERS
- ☐ IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES
- ☐ FADED TEXT OR DRAWING
- ☒ BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING
- ☐ SKEWED/SLANTED IMAGES
- ☐ COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS
- ☐ GRAY SCALE DOCUMENTS
- ☒ LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT
- ☐ REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY
- ☐ OTHER: \_\_\_\_\_

**IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.**

**As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.**